



# Stabilité des Berges de Rivières Soumises à la Variation du Niveau d'eau

Chhun Soksan, Juan Martinez, Than Son Huynh

## ► To cite this version:

Chhun Soksan, Juan Martinez, Than Son Huynh. Stabilité des Berges de Rivières Soumises à la Variation du Niveau d'eau. Entretien Jacques Cartier. L'eau en partage: enjeu de développement dans la région du Mékong., Nov 2014, Ho Chi Minh Ville, Vietnam. hal-01132749

**HAL Id: hal-01132749**

**<https://hal.science/hal-01132749>**

Submitted on 17 Mar 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Stabilité des Berges de Rivières Soumises à la Variation du Niveau d'eau

Chhun Soksan<sup>1</sup>, Martinez Juan<sup>2</sup>, Huynh Thanh Son<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Technology of Cambodia, PO Box 86, Russian Conf. Blvd., Phnom Penh, Cambodia.

<sup>2</sup> Institut National des Sciences Appliquées, 20 Avenue des Buttes de Coesmes, 35708 Rennes, France.

<sup>3</sup> Ho Chi Minh City University of Technology, 268 Lý Thường Kiệt, Hồ Chí Minh City, Vietnam.

## 1. Introduction

Les glissements des berges posent des problèmes dans de nombreux fleuves et rivières avec des conséquences qui peuvent être particulièrement graves telles que l'effondrement des ouvrages et des habitations avec parfois des victimes humaines. Ces glissements de terrain peuvent être imputés en partie à l'extension de l'urbanisation et aux infrastructures, à la déforestation, à l'abandon de l'entretien des prairies des berges, à l'érosion des berges, aux crues et aux inondations. Ces effets sont aggravés par le changement climatique (pluie, neige, gel...), par la variation de la nappe phréatique et par les séismes (Flageollet, 1988 ; Palhol et al. 2010 ; AIPCR, 2012). Ce problème revêt une acuité particulière dans les pays en développement où les systèmes de protection (digues) sont inexistants ou rudimentaires et où les berges sont un lieu privilégié de concentration humaine.

De façon générale, des accidents fréquents ont été constatés lors de crues exceptionnelles et lors de la variation rapide du niveau d'eau pendant la période d'étiage (AUF, 2006) et de basse mer de la marée (Rezzoug, 1994). D'autre part, pour les berges curvilignes, l'instabilité a lieu habituellement après les pointes de crue (Rinaldi et al., 2008).

La variation brutale du niveau d'eau dans la rivière change la surface libre de l'eau dans le sol et donc affecte la pression interstitielle. La variation temporelle de la marée et de la surface libre près de la berge sont des phénomènes compliqués (Rezzoug, 1994) agissant sur les mécanismes d'instabilité des berges. D'une part, l'eau de la rivière exerce une pression favorable à la stabilité; d'autre part, la pression interstitielle dans le sol réduit la résistance au cisaillement du sol et augmente le risque d'instabilité.

Le présent travail consiste à étudier la stabilité des berges de rivière soumises à la variation du niveau d'eau en considérant l'influence des écoulements externe et interne de l'eau sur le massif du sol. Les calculs sont développés dans le programme MESTab (Chhun, 2013). Le modèle d'écoulement de Dupuit est adopté pour trouver la variation de la surface libre dans le massif. Pour le calcul de la stabilité, on adoptera la méthode classique des tranches associée à un coefficient de sécurité et couplée avec le calcul hydraulique. Pour un cas de la marée, on va analyser la stabilité des berges avec l'influence des différents paramètres du sol et de la géométrie de la berge.

## 2. Mise en équations

### 2.1. Surface libre dans la berge

Dans son modèle, Dupuit (1863) a supposé que dans un massif homogène et isotrope la charge hydraulique est constante sur une verticale et égale à la cote de la surface libre. Le sol est considéré saturé en dessous de la surface libre et la pression atmosphérique règne au-dessus de celle-ci. Le modèle de Dupuit en régime transitoire conduit à l'équation unidimensionnelle non linéaire suivante de la surface libre (Figure 1) :

$$\frac{\partial H(X, t)}{\partial t} = \frac{k_o}{2n_o} \frac{\partial^2 H^2(X, t)}{\partial X^2} \quad (1)$$

où  $k_o$  et  $n_o$  sont la perméabilité et la porosité du massif respectivement, et  $H(X, t)$  est la hauteur de la surface libre à l'abscisse  $X$  à l'instant  $t$ .

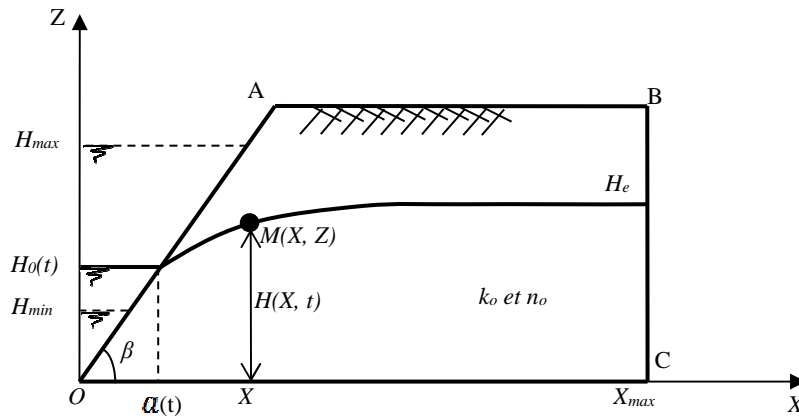


Figure 1: Surface libre et notations

L'équation (1) peut être résolue numériquement en différences finies dans le temps et l'espace (Goncalves, 2005). Finalement la forme discrétisée de l'équation est :

$$H(X, t + \Delta t) = H(X, t) + K \left[ H^2(X + \Delta X, t) - 2H^2(X, t) + H^2(X - \Delta X, t) \right] \quad (2)$$

où  $K = \frac{k_o}{2n_o} \frac{\Delta t}{\Delta X^2}$  est un coefficient qui doit être inférieur à une valeur ( $K_{max}$ ) pour obtenir la stabilité de calcul numérique (Chhun, 2013).

La position initiale de la surface libre dans le massif,  $H(X, t=0)$ , est supposée horizontale arbitrairement dans la plupart des cas ou bien connue suite à des mesures.

La condition sur la limite latérale le long de la berge ( $OA$ ) d'abscisse  $X = a(t)$ , suit la variation du niveau d'eau dans la rivière en fonction du temps.

$$H(a(t), t) = H_o(t) \quad (3)$$

Dans le cas général à partir de la condition (3), la surface libre sera calculée dans le domaine  $X > a(t)$ .

La condition latérale à « l'infini » du massif ( $BC$ ) correspond à une asymptote de surface libre horizontale qui est équivalente à une vitesse d'écoulement nulle sur cette frontière :

$$H(X_{\max}, t) = H(X_{\max} - \Delta X, t) \quad (4)$$

Dans le cas d'une variation périodique de la marée de période  $T$ , les calculs sont effectués en simulant des cycles de marée jusqu'à obtention de la périodicité de la surface libre dans le massif (au bout de  $n$  cycles). La précision est définie par le décalage de deux profils calculés au même instant sur deux cycles successifs de marée (Chhun, 2013) :

$$\max_j \left[ \sum_i |H_{i,j+nT} - H_{i,j+(n-1)T}| \right] < 0.01m \quad (5)$$

## 2.2. Stabilité de talus : Méthode Simplifiée des tranches

L'analyse traditionnelle de stabilité de talus utilise la méthode des tranches. Des méthodes d'analyse plus modernes font appel aux calculs numériques (éléments finis). Cependant, la mise en œuvre de ces dernières s'avère très lourde pour le suivi pas à pas de phénomènes temporels comme la marée (Ho, 2008). Afin d'introduire facilement l'évolution de la surface libre présentée ci-avant en fonction de la marée, nous avons programmé la méthode simplifiée des tranches avec des forces inter-tranches nulles.

On considère une surface de rupture cylindrique surmontée éventuellement par un plan vertical (surplomb) représentés sur la Figure 2. Nous adopterons le critère de Mohr-Coulomb

$$\tau_R = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (6)$$

où  $\tau_R$  est la résistance de cisaillement disponible,  $\sigma'$  est la contrainte normale effective sur la surface de rupture,  $c'$  est la cohésion effective du sol et  $\varphi'$  est l'angle de frottement interne effectif. En utilisant l'équilibre des forces dans la direction perpendiculaire à la base de chaque tranche, l'équilibre des moments de chaque tranche et de l'ensemble des forces pour toutes les tranches par rapport au centre du cercle de rupture, finalement on obtient le facteur

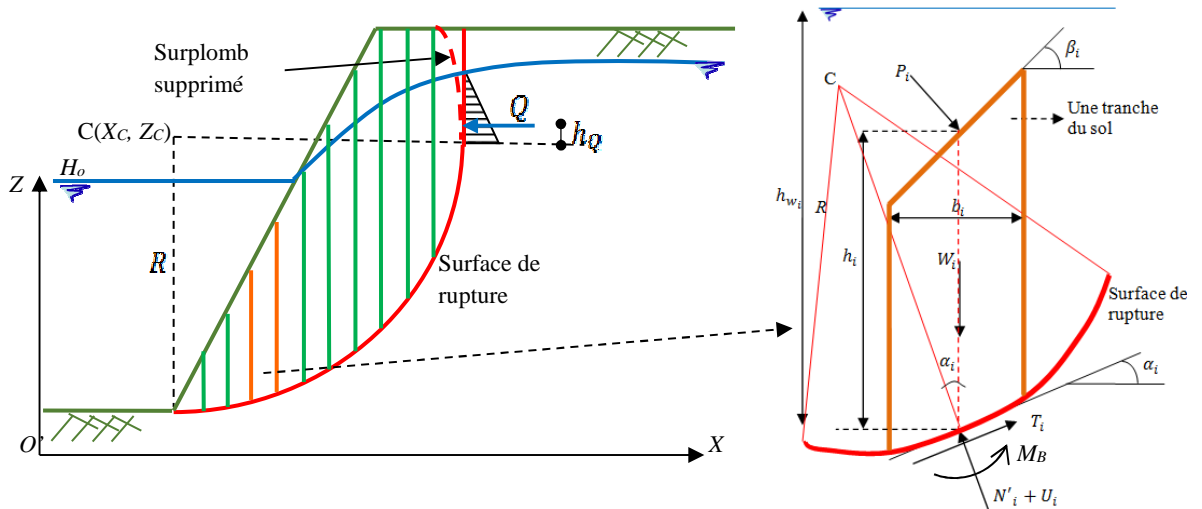


Figure 2 : Surface de rupture cylindrique divisée en tranches et forces appliquées sur une tranche  $i$

de sécurité globale qui représente le ratio des efforts résistants sur les efforts mobilisés le long de la surface de rupture ci-dessous :

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n C'_i + N'_i \tan \varphi'_i}{\sum_{i=1}^n [(W_i + P_i \cos \beta_i) \sin \alpha_i - P_i \sin \beta_i \cos \alpha_i] - Q \frac{h_Q}{R}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{r_i}}{\sum_{i=1}^n T_{m_i}} \quad (7)$$

où  $T_{r_i}$  et  $T_{m_i}$  sont la force de résistance au cisaillement disponible et la force de cisaillement mobilisée sur la base de la tranche  $i$  respectivement;  $C'_i$  et  $U_i$  sont la force de cohésion et la pression interstitielle sur la base de la tranche  $i$  respectivement;  $W_i$  est le poids de la tranche  $i$ ;  $P_i$  est la pression d'eau dans la rivière sur la surface de la tranche  $i$ ;  $Q$  est la pression d'eau sur la surface de rupture verticale en cas de surplomb;  $R$  est le rayon de cercle de rupture, et  $\alpha_i, \beta_i, h_i, h_Q$  sont des grandeurs géométriques indiquées sur la Figure 2.

### 3. Analyse de la stabilité pendant un cycle de marée

La stabilité de berge est étudiée pendant un cycle de marée sinusoïdale où le niveau maximum  $H_{max}=9.5m$ , le niveau minimum  $H_{min}=6.5m$  et la période  $T=12h$ . Pour une géométrie de berge et un sol de caractéristiques données, la stabilité dépend de deux paramètres principaux : la pression de l'eau sur la surface de la berge (effet favorable) et la pression interstitielle dans le sol (effet défavorable).

La Figure 3 représente les variations de surface libre au cours du reflux et la surface de glissement critique. La Figure 4 montre que la variation du coefficient de sécurité suit sensiblement la variation de la marée, ce qui démontre l'effet prépondérant de la pression d'eau sur la surface de la berge. Pendant le reflux, la surface libre dans le sol reste élevée (Figure 3) et la pression stabilisatrice ( $P$ ) de l'eau dans la rivière diminue davantage que la pression interstitielle  $U$  (déstabilisatrice) dans le sol, par conséquent la force mobilisée ( $T_m$ ) augmente plus vite que la force résistante ( $T_r$ ) et donc le coefficient de sécurité diminue.

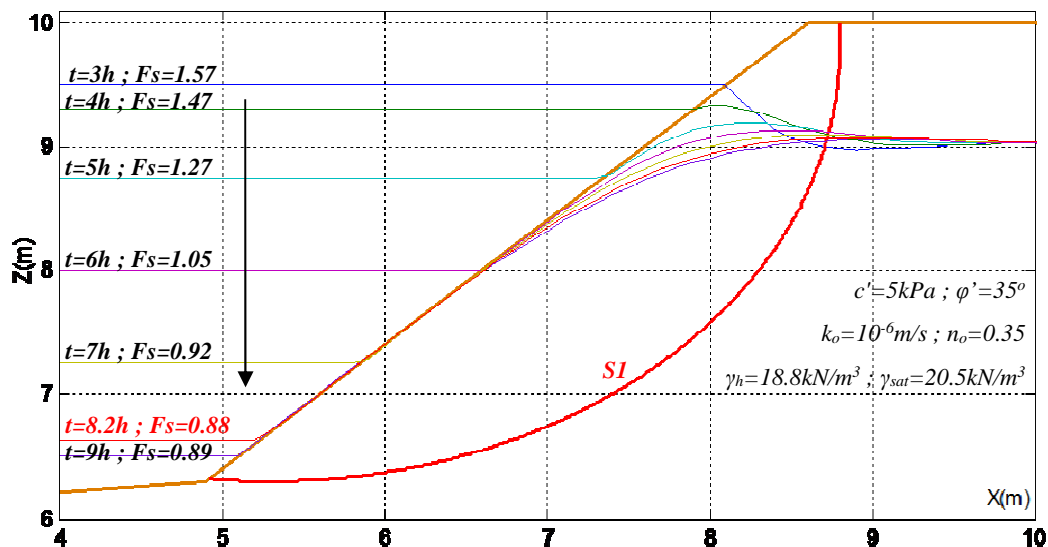


Figure 3 : Coefficient de sécurité pour différents niveaux d'eau à marée descendante pour la même surface de glissement

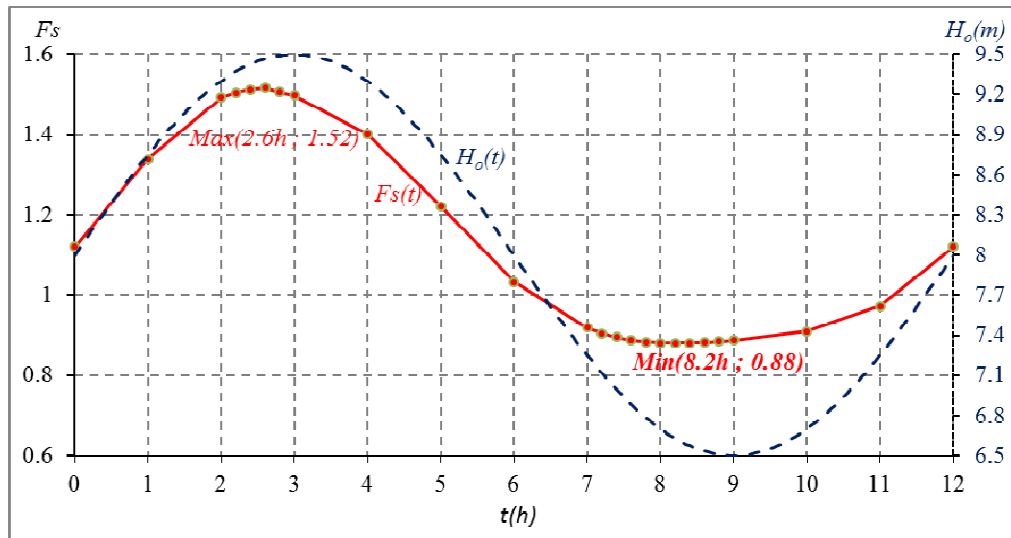


Figure 4 : Variation de coefficient de sécurité pour un période de marée

Le facteur de sécurité est maximal avant la marée haute. Le moment critique correspondant au coefficient de sécurité minimal  $F_{s_{min}}=0.88$  (conduisant à la rupture) se produit pendant le reflux avant la basse mer ( $t_{cr}=8.2h$ ) ce qui peut s'expliquer par le ralentissement de la vitesse du reflux avant la basse mer ( $t \in [8.2h ; 9h]$ ) et par l'effet de drainage avec le temps dû à la perméabilité du sol considérée. D'une part, dans cet intervalle de temps, la variation du niveau d'eau ( $\Delta H_o=0.13m$ ) et de la pression  $P$  sont petites. D'autre part, dans cet intervalle de temps, la surface libre et donc la pression interstitielle dans le sol continue à descendre du fait de la perméabilité. En conséquence, la valeur de coefficient de sécurité augmente.

#### 4. Etude paramétriques sur la stabilité des berges

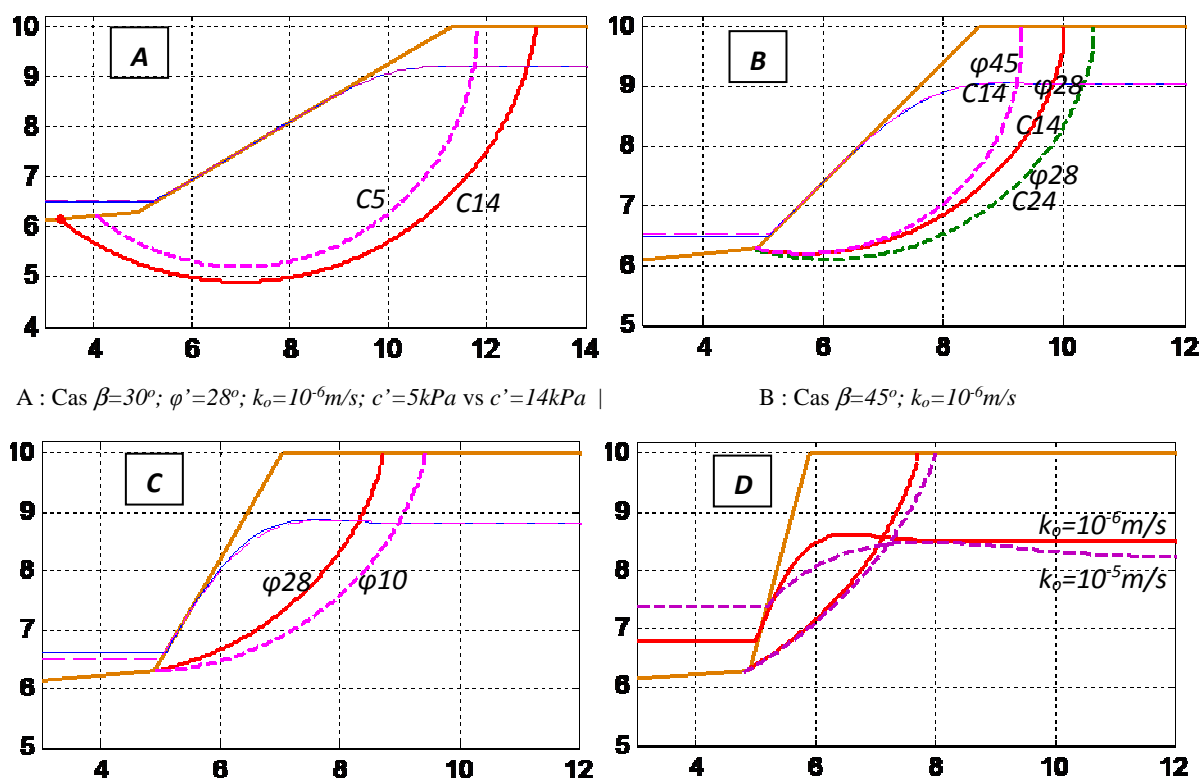
Pour les paramètres de la marée précédente, on fait varier la pente de la berge, la perméabilité, la cohésion et l'angle de frottement interne du sol. Le Tableau 1 et la Figure 5 montrent les moments critiques, les coefficients de sécurité et les surfaces de glissement respectivement pour différents paramètres considérés. Les résultats que l'on peut noter sont les suivants :

- Pour les mêmes paramètres du sol ( $c'=14kPa$  ;  $\varphi'=28^\circ$  ;  $k_o=10^{-6}m/s$ ), lorsque la pente de la berge augmente, le coefficient de sécurité diminue naturellement, le moment critique se produit plus tôt avant la basse mer, et la ligne de glissement devient plus verticale, et le volume du bloc en glissement plus réduit.
- Lorsque l'importance relative de la cohésion augmente par rapport à l'angle de frottement interne (A, B et C), on observe que les surfaces de glissement sont plus étendues et le moment critique  $T_{cr}$  de rupture se rapproche de la basse mer. Dans ce cas, la résistance au cisaillement le long de la surface de rupture est moins dépendante de la pression interstitielle et davantage de l'action directe de l'eau sur la berge, d'où un déphasage faible. Par ailleurs, avec une surface de rupture étendue, la plus grande partie de celle-ci reste sous la surface libre horizontale et donc sous pression interstitielle constante. Donc, la surface de rupture est moins influencée par la surface libre voisine de la berge.
- Pour différentes perméabilités du sol (Figure 5D), on note que le coefficient de sécurité et le déphasage de l'instant critique diminuent quand le sol est moins perméable. Les surfaces

de rupture ne semblent pas en outre très influencées par la perméabilité. La diminution du coefficient de sécurité lorsque la perméabilité décroît, peut s'expliquer par le niveau plus élevé de la surface libre et donc par une pression interstitielle dans le sol plus élevée. Par ailleurs on constate une moindre variation de la surface libre dans le sol lorsque celui-ci est moins perméable. Ceci rend la variation du facteur de sécurité fortement corrélée avec la marée via la pression de l'eau sur la surface de la berge.

Tableau 1 : Moments critiques et coefficients de sécurité pour différentes pentes de la berge

Figure 5	A		B			C		D	
$\beta(^{\circ})$	30	30	45	45	45	60	60	75	75
$k_o (m/s)$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$
$\varphi'(^{\circ})$	28	28	45	28	28	28	10	28	28
$c' (kPa)$	5	14	14	14	24	14	14	14	14
$H_o (m)$	6.51	6.5	6.53	6.51	6.51	6.63	6.51	6.79	7.39
$T_{cr} (h)$	8.8	9	8.6	8.8	8.8	8.2	8.8	7.8	6.8
$F_{Smin}$	1.02	1.87	1.95	1.62	2.47	1.43	1.18	1.27	1.39



A : Cas  $\beta=30^{\circ}$ ;  $\varphi'=28^{\circ}$ ;  $k_o=10^{-6}m/s$ ;  $c'=5kPa$  vs  $c'=14kPa$  |

B : Cas  $\beta=45^{\circ}$ ;  $k_o=10^{-6}m/s$

C : Cas  $\beta=60^{\circ}$ ;  $c'=14kPa$ ;  $k_o=10^{-6}m/s$ ;  $\varphi'=10^{\circ}$  Vs  $\varphi'=28^{\circ}$  | D : Cas  $\beta=75^{\circ}$ ;  $c'=14kPa$ ;  $\varphi'=28^{\circ}$ ;  $k_o=10^{-6}m/s$  Vs  $k_o=10^{-5}m/s$

Figure 5: Surfaces de glissement pour différentes pentes de la berge

## 5. Conclusions

Les méthodes de simulation simplifiées adoptées, couplant l'écoulement de type Dupuit avec la stabilité des berges par la méthode des tranches de Fellenius (Programme MESTab), ont permis d'étudier l'influence des différents paramètres du sol, de la géométrie de la berge, de la variation temporelle de la surface libre et de la marée qui affectent la stabilité des berges.

## 6. Références bibliographiques

- AIPCR, 2012: Vulnérabilité des infrastructures géotechniques au changement climatique et mesures d'adaptation selon le contexte géographique. Comité technique D.4 Géotechnique et routes non revêtues, Association mondiale de la Route (AIPCR), France. réf. 2012R04FR. Site : [www.piar.org](http://www.piar.org)
- AUF - Agence Universitaire de la Francophonie, 2006: Etude de la stabilité des berges du fleuve Mékong. PCSIU réf. Juin 2006.
- Chhun, S., 2013: Etude de la stabilité des berges de rivière soumises à la marée, PhD thesis, INSA de Rennes
- Dupuit, J., 1863: Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables (Second Edition ed.). Paris: Dunod
- Flageollet, J.C., 1988: Les Mouvements de Terrain et Leur Prévention. Masson, Paris, France.
- Goncalvès, E., 2005: Méthodes, analyse et calculs numériques. Institut Polytechnique de Grenoble, France
- Palhol, H., Rojat, F., Rucquoi, S., Gasc-Barbier, M., 2010: Evaluation de l'impact du changement climatique sur l'aléa « mouvement de terrain ». Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2010 –Grenoble.
- Rezzoug, A., 1994: Influence de la marée sur un sol semi-immergé. Thèse de doctorat, Université de Nantes, France.
- Rinaldi, M., Mengoni, B., Luppi, L., Darby, S. E. and Mosselman, E., 2008: Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend, Water Resour. Res., 44, W09428, doi:10.1029/2008WR007008.